

风电机组叶片流固耦合的数值模拟方法

王伟龙, 田德, 邓英, 林俊杰

华北电力大学, 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206

摘要 以某5 MW风电机组叶片模型为对象, 研究一种适用于风电机组叶片流固耦合数值模拟的风轮旋转模拟方法。以风切变形式模拟风轮旋转及来流风速的综合效应, 对叶片各截面翼型的扭角进行修正, 建立风电机组叶片的风轮旋转模拟模型, 利用有限元法模拟风电机组叶片的风洞流场实验, 仿真模拟旋转效应下风电机组叶片的周围气压、绕流分布、表面压力及结构位移, 并进行数据交叉迭代求解, 得到风电机组叶片的流固耦合结果。与额定风速均匀来流条件下的初始模型计算结果和文献实验结果进行对比分析, 验证了风轮旋转模拟方法的可行性。

关键词 风电机组叶片; 流固耦合; 风切变; 风轮旋转模拟

随着风电机组单机容量的不断增大, 风电机组叶片尺寸也越来越长。对于超长风电机组叶片的气动计算及结构计算, 常规的叶片刚性体假设所引起的误差越来越大, 因此必须考虑叶片在风载条件下结构变形对气动力的影响。流固耦合(fluid-structure interaction, FSI)是研究风电机组叶片气弹特性及结构特性的重要手段, 国内外通过流固耦合对叶片结构响应、流场变化、叶片载荷分布等特性进行了一系列研究。流固耦合按照求解方法可分为完全耦合和交替求解。李媛等^[1]以MPCCI为数据交换平台连接商用CFD、CSD软件, 模拟考虑风切变时轮毂高度额定风速下的风轮全三维流固耦合, 分析了风剪切对叶片绕流、变形以及耦合作用对载荷分布的影响规律。胡丹梅等^[2]采用 k -SST紊流模型和滑移网格技术, 对海上风电机组叶片进行了流固耦合计算分析, 发现叶片流固耦合作用使叶片气动攻角、扭矩增大。Zahle等^[3,4]采用不可压缩重叠网格技术, 分析了水平轴风电机组风轮与塔架间的耦合作用。Hsu等^[5]通过对5 MW三叶片水平轴风电机组风轮在有塔架情况下进行了流固耦合研究, 发现叶片转过塔架时由于塔影效应使单个叶片气动扭矩降低10%~12%。Zhang等^[6]通过对比研究, 发现风切变对风电机组叶片变形及应力的影响明显大于流固耦合所产生的作用。任年鑫等^[7]基于三维黏性不可压缩Navier-Stokes方程和重整化群 k - ϵ (RNG)湍流模型, 数值模拟美国可再生能源实验室(NREL)5 MW海上风电机组的气动性能, 并研究了浮式平台不同运动幅值及运动周期对风电机组叶片气动性能

的影响规律。陈海萍等^[8]选用 k - ϵ 湍流模型, 将风作为黏性不卡压缩流体, 计算出流固耦合作用下风电机组叶片的应变分布。李德源等^[9]采用计算多体系统动力学理论, 基于R-W(Roberson-Wittenburg)建模方法, 建立柔性叶片的气弹耦合方程, 结合相应的风电机组气动载荷分析模块, 实现了叶片的气弹耦合分析。王旭东等^[10]将叶片的启动与结构力学模型进行耦合, 研究叶片变形对来流的影响, 提出一种旋转叶片结构性能分析方法。Dong等^[11]应用CFD-CSD耦合方法对风电机组叶片的载荷及气弹特性进行研究, 发现叶片气弹变形显著降低气动载荷。MEXICO(model experiment in controlled conditions)实验是由欧盟资助的一项大型风电机组实验。梁明轩^[12]通过对叶片模态分析得到叶片各阶模态, 发现叶片扭转、挥舞、摆振三者之间的耦合, 并对叶片气动弹性问题进行研究, 建立叶片颤振方程, 确定了叶片颤振发散条件。杨华等^[13]应用风电机组旋转叶片表面压力的三维PIV(particle image velocimetry)流场测量方法, 测试得到无偏航工况下叶片上5个测试断面的表面压力系数分布, 并计算了该工况下叶轮所受的轴向力和切向力。潘旭^[14]运用Ansys、CFX基于Ansys Workbench软件平台对某MW级水平轴风电机组叶片进行流固耦合数值模拟, 分析了耦合过程中叶片的变形及应力变化。陆洋等^[15]利用Newmark数值积分法获得叶片气弹响应的稳态周期解, 分别以NREL Phase VI非定常空气动力学实验及其公开的1.5 MW风电机组叶片为算例计算了有/无预弯叶片的气弹响应。以上研究均通过建立风轮旋

收稿日期: 2015-08-20; 修回日期: 2015-10-30

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2009BAA22B02)

作者简介: 王伟龙, 博士研究生, 研究方向为风力发电过程中的流固耦合问题, 电子信箱: amu_love@126.com; 田德(通信作者), 教授, 研究方向为风力发电系统理论与技术, 电子信箱: tdncepu@163.com

引用格式: 王伟龙, 田德, 邓英, 等. 风电机组叶片流固耦合的数值模拟方法[J]. 科技导报, 2016, 34(2): 59-64; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.2.008

转的计算模型对风轮流固耦合进行研究,网格划分困难,涉及到移动域与静止域网格匹配等复杂过程,计算成本高。为此,本文采用风切变形式模拟风轮旋转及来流风速的综合效应,研究风电机组叶片流固耦合数值模拟的一种新方法。

1 流体计算模型

1.1 流体域求解方法

流场中的控制体既不能产生质量也不能消灭质量,因此它满足质量守恒定律。该定律在流场中的数学表达式为连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

式中, ρ 、 t 、 \mathbf{V} 分别为流体密度、时间和流体速度。

动量守恒定律可表述为:控制体中流体的动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力之和。其在流场中的数学表达式为运动方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial t} + \text{div}(\rho V_x \mathbf{V}) &= \text{div}(\mu \text{grad } V_x) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_{V_x} \\ \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial t} + \text{div}(\rho V_y \mathbf{V}) &= \text{div}(\mu \text{grad } V_y) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_{V_y} \\ \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial t} + \text{div}(\rho V_z \mathbf{V}) &= \text{div}(\mu \text{grad } V_z) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_{V_z} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中,等式分别为控制体在 x 、 y 、 z 方向的动量方程; μ 为流体运动方程的广义散度; V_x 、 V_y 、 V_z 分别为流体流速在 x 、 y 、 z 方向的分量; p 为流体压力; S_{V_x} 、 S_{V_y} 、 S_{V_z} 为流体运动方程的广义源项。

能量守恒定律是流动系统必须满足的基本定理,在不考虑温度变化条件下,其数学表达式为

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho V^2}{2} \right) = \nabla F + \frac{1}{\rho} \nabla(PV) - \frac{1}{\rho} (P \nabla) V \quad (3)$$

式中, F 为质量力, P 为表面压强。

1.2 叶素速度

风电机组风轮运行过程中实际参考风速为来流风速和旋转风速的共同作用,通过改变叶片不同叶展处的风速可实现正常来流风速和旋转风速的叠加效果。不同叶展处的参考风速 V_{ref} 的计算公式为

$$V_{ref} = \sqrt{V_0^2(1-a)^2 + \omega^2 r^2(1+a')^2} \quad (4)$$

式中, V_0 为自然来流风速; ω 为风轮旋转角速度; r 为叶展位置的旋转半径; a 为轴向诱导系数; a' 为切向诱导系数。

叶素速度矢量的三角形关系如图1所示,图中 α 、 β 、 ϕ 分

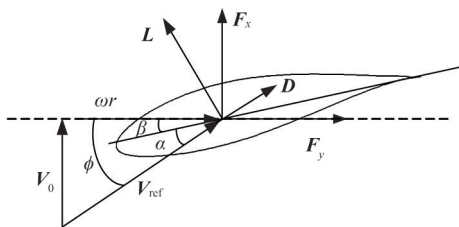


图1 叶素速度的三角形关系

Fig. 1 Velocity triangle relationship for blade element

别为攻角、桨距角及入流角; L 、 D 分别为叶素升力及阻力; F_x 、 F_y 分别为单位叶素上垂直于旋转平面的推力及平行于旋转平面的切向力。忽略诱导速度的影响,则 F_x 及 F_y 的表达式为

$$F_x = \frac{1}{2} \rho V_{ref}^2 C_l c \cos \phi + \frac{1}{2} \rho V_{ref}^2 C_d c \sin \phi \quad (5)$$

$$F_y = \frac{1}{2} \rho V_{ref}^2 C_d c \cos \phi - \frac{1}{2} \rho V_{ref}^2 C_l c \sin \phi \quad (6)$$

式中, ρ 、 c 、 C_l 、 C_d 分别表示空气密度、翼型弦长、升力系数和阻力系数;入流角 ϕ 的计算公式为

$$\phi = \arctan \frac{V_0}{\omega r} \quad (7)$$

2 结构计算模型

2.1 结构计算方法

风电机组叶片为多自由度有阻尼的非线性结构,其结构动力学运动方程为

$$\mathbf{M} \mathbf{u}''(t) + \mathbf{C} \mathbf{u}'(t) + \mathbf{K} \mathbf{u}(t) = \mathbf{P}(t) \quad (8)$$

式中, \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为结构的质量阵、阻尼阵及刚度阵; $\mathbf{u}''(t)$ 、 $\mathbf{u}'(t)$ 、 $\mathbf{u}(t)$ 分别为随时间变化的加速度向量、速度向量及位移向量; $\mathbf{P}(t)$ 为作用在叶片上面的时变载荷。

在无阻尼情况下方程有非零解的条件为其系数行列式为零,即

$$\det(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) = 0 \quad (9)$$

式中, ω 为振动圆频率。

考虑叶片所受随机风载荷对刚度的影响,在刚度矩阵中加入应力项,即

$$(\mathbf{K} + \mathbf{S} - \omega_i^2 \mathbf{M}) \Phi_i = 0 \quad (10)$$

式中, Φ_i 为振型,下标 i 为阶数。

风电机组叶片运动的流固耦合(FSI)方程可通过一个数值的Newmark时间积分方法求解。假设2个时间瞬间之间的加速度是线性变化的,则速度及位移的计算公式为

$$u'_{i+\Delta t} = u'_i + [(1-\gamma)u''_{i+\Delta t} + \gamma u''_i] \Delta t \quad (11)$$

$$u_{i+\Delta t} = u_i + u'_i \Delta t + [(0.5-\eta)u''_{i+\Delta t} + \eta u''_i] \Delta t^2 \quad (12)$$

式中, u''_i 、 u'_i 、 u_i 分别为时间为 t 时刻的加速度、速度及位移; γ 、 η 为基于稳定性和精度选择的Newmark参数。该方法是通过引入位移增量 Δu ,求解FSI运动方程,得到时间 $t+\Delta t$ 时刻的位移、速度及加速度。 $u''_{i+\Delta t}$ 、 $u'_{i+\Delta t}$ 、 $u_{i+\Delta t}$ 与 u''_i 、 u'_i 、 u_i 的函数对应关系为

$$u''_{i+\Delta t} = \frac{1}{\eta \Delta t^2} \Delta u - \frac{1}{\eta \Delta t} u'_i - \left(\frac{1}{2\eta} - 1 \right) u''_i \quad (13)$$

$$u'_{i+\Delta t} = \frac{\gamma}{\eta \Delta t} \Delta u - \left(\frac{\gamma}{\eta} - 1 \right) u'_i \Delta t - \left(\frac{\gamma}{2\eta} - 1 \right) u''_i \quad (14)$$

$$u_{i+\Delta t} = u_i + \Delta u \quad (15)$$

2.2 叶片结构模型

为了用静止叶片模拟叶片旋转效应,只通过将叶素处的速度按照速度矢量关系修正还不能达到应有效果,需要对叶片不同截面处翼型的气动扭角进行修正。如图1所示,以旋转导致的风速方向作为参考方向,将该截面处的翼型进行顺

时针旋转,旋转角 θ 等于入流角 ϕ 。新翼型各点坐标相对于原坐标的计算公式为

$$\begin{cases} x' = x \cos\theta - y \sin\theta \\ y' = x \sin\theta + y \cos\theta \end{cases} \quad (16)$$

根据逆时针为正、顺时针为负的原则,同时考虑轴向诱导系数及切向诱导系数,翼型旋转角度 φ 的计算公式为

$$\theta = -\phi = -\arctan \frac{V_0(1-a)}{\omega r(1+a')} \quad (17)$$

根据扭角修正方法,对某5 MW 风电机组叶片各截面处的翼型扭角进行修正,修正后建立整个叶片的结构模型,如图2所示。

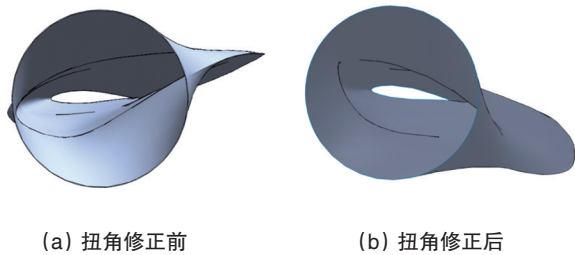


图2 翼型扭角修正前后的叶片结构

Fig. 2 Blade structures before and after the torsion angle modification of the airfoil

3 边界条件

耦合系统以MPCCI为数据交换平台,采用弱耦合方式,数据传递过程中固体与流体分别求解,只在耦合界面上进行数据交换,耦合过程如图3所示。流固耦合交界面上分别满足边界位移及应力的连续性,即

$$\begin{cases} d_s^{\Gamma^{FS}} = d_f^{\Gamma^{FS}} \\ n_s^{\Gamma^{FS}} \cdot \tau_s^{\Gamma^{FS}} = n_f^{\Gamma^{FS}} \cdot \tau_f^{\Gamma^{FS}} \end{cases} \quad (18)$$

式中, d 、 n 、 τ 分别为位移、法向量及应力; Γ^{FS} 为交界面;下角标F、S分别表示流体域及结构域。

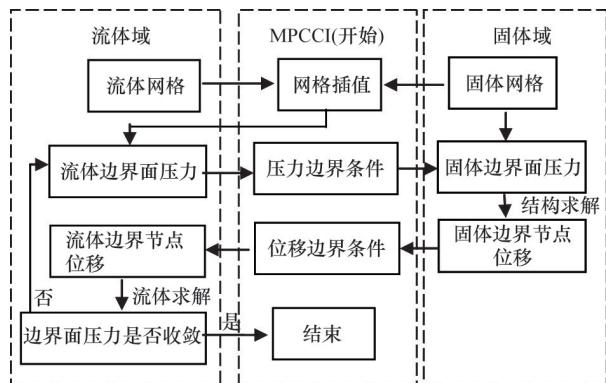


图3 流固耦合计算流程
Fig. 3 Flow chart of FSI

4 算例分析

4.1 模型基本参数

以某年平均风速8 m/s的二类风电场中5 MW 风电机组叶片为研究对象,该机组风轮直径127 m,叶片长62 m,额定风速12.2 m/s,风轮额定转速13.5 r/min。在额定风速及额定转速条件下,根据上述方法对叶片进行计算,得到各翼展处的参考风速及修正角度如表1所示。

表1 不同展向位置处的参考风速及修正角度
Table 1 Reference wind speed and correction angle at different spanwise positions

展向位置/m	参考风速/(m·s ⁻¹)	修正角度/(°)
10.5	16.0	-39.4
16.5	24.3	-27.6
20.5	29.9	-22.8
24.5	35.5	-19.4
28.5	41.1	-16.8
32.5	46.7	-14.8
36.5	52.3	-13.3
40.5	57.4	-12.3
48.5	69.2	-10.1
54.5	77.1	-9.2
58.5	82.7	-8.4
60.5	85.6	-8.1

根据表1的参考风速及修正角度,进行风电机组叶片结构建模,得到修正前后叶片的结构模型(图2)。对修正后的结构模型进行有限元离散化,得到流场计算的全局网格及局部网格单元如图4所示。计算节点共计30万,网格单元共计86万。

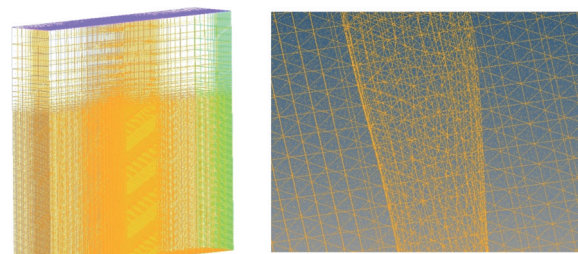


图4 用于流场计算的全局网格及局部网格单元
Fig. 4 Global and local grid cells for CFD

采用等效质量、刚度分布的方法建立风电机组叶片壳结构模型。叶根段厚度为0.12 m,叶尖段为0.012 m,中间各段厚度沿展向线性变化,网格采用三角形壳单元S3R。节点总数5000,单元总数10000。用于结构计算的叶片有限元网格单元如图5所示。

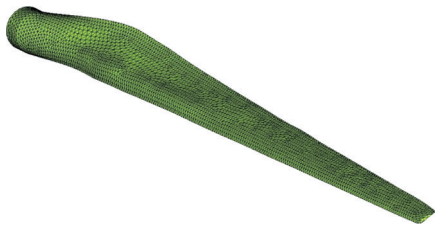


图5 用于结构计算的叶片有限元网格单元
Fig. 5 Finite element mesh for structural calculation

4.2 结果分析

风轮旋转模拟模型与均匀来流初始模型的风电机组叶片表面压力计算结果对比如图6所示。两种模型的叶片表面压力呈现相同的变化规律,由叶根到叶尖逐渐减小;靠近叶尖处同一翼型截面上压力沿前缘到尾缘先迅速减小到最小值,后逐渐增大。数值上,旋转模拟模型叶片的表面压力小于均匀来流初始模型,整体误差小于5%,验证了风轮旋转模拟模型的可靠性。

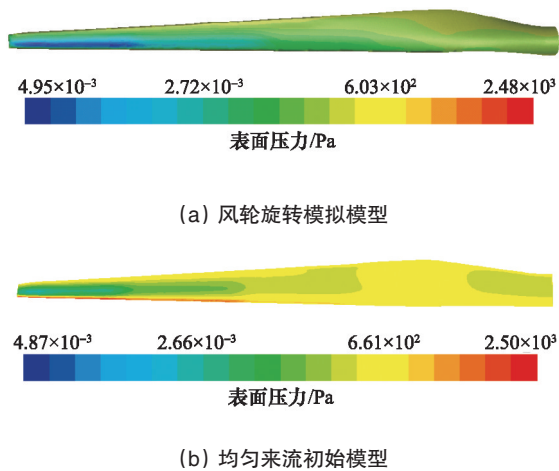
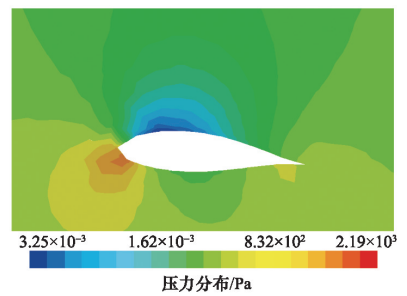


图6 两种模型叶片表面压力对比
Fig. 6 Comparison of blade surface pressures for two models

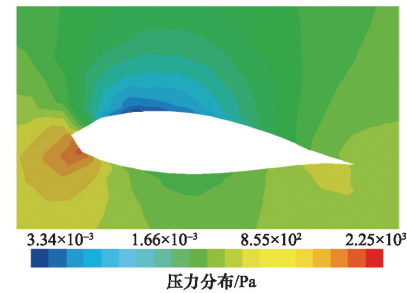
风轮旋转模拟模型与均匀来流初始模型的风电机组叶片40 m展向位置翼型周围气压、流速的计算结果如图7及图8所示。

两种模型叶片40 m展向位置翼型周围气压分布,与MEXICO实验^[14]60%半径位置测试压力数据呈现相同的变化规律,翼型升力侧压力小于压力侧压力;翼型压力侧表面压力从前缘到尾缘呈现先减小后增大的变化趋势,最大压力位于前缘点靠下位置,最小压力位于升力侧30%弦长处。

两种模型叶片40 m展向位置翼型周围空气流速分布规律相同,翼型升力侧流速大于压力侧流速;翼型压力侧附近流速从前缘到尾缘先增大后减小,最小流速位于前缘点靠下



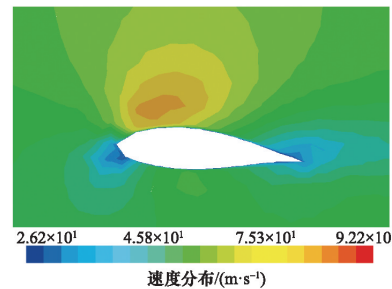
(a) 风轮旋转模拟模型



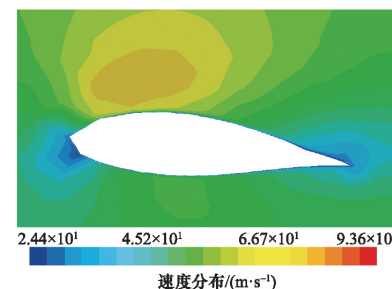
(b) 均匀来流初始模型

图7 两种模型叶片40 m展向处翼型周围压力分布对比

Fig. 7 Pressure distribution comparison around the airfoil at the spanwise position of 40 meter for two models



(a) 风轮旋转模拟模型



(b) 均匀来流初始模型

图8 两种模型叶片40 m展向处翼型周围流场分布对比
Fig. 8 Speed distribution comparison around the airfoil at the spanwise position of 40 meter for two models

位置,最大流速位于升力侧约25%弦长处。

两种模型叶片40 m展向位置翼型周围气压及流速计算结果的整体误差在3%以内。

风轮旋转模拟模型与均匀来流初始模型的风电机组叶片结构位移计算结果对比如图9所示。两种模型叶片的结构位移从叶根到叶尖逐渐增大,在叶尖达到最大值。旋转模拟模型叶片的最大结构位移计算结果为5.98 m,均匀来流初始模型叶片的最大结构位移计算结果为5.74 m,误差小于3%。

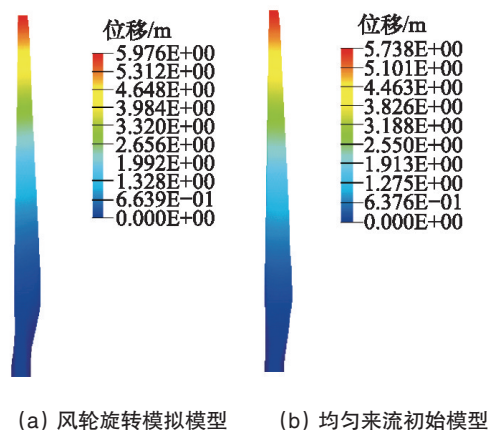


图9 两种模型叶片位移对比

Fig. 9 Comparison of blade tip displacements for two models

5 结论

以风切变形式模拟风轮旋转与来流风速综合效应,对风电机组叶片各展向位置翼型的扭角进行修正,提出一种用于风电机组叶片流固耦合数值模拟的风轮旋转模拟模型。在轮毂中心处风速为额定风速条件下,应用风轮旋转模拟模型对风电机组叶片进行三维流固耦合数值计算,并与均匀来流初始模型计算结果及文献实验结果进行了对比分析。风轮旋转模拟模型叶片40 m展向位置翼型周围气压的仿真计算结果与MEXICO实验测试结果的分布规律相同。两种模型叶片的表面压力、翼型周围气压及流速计算结果的分布规律相同,风轮旋转模拟模型得到的叶片面压力小于均匀来流初始模型的计算结果,整体误差小于5%;叶片40 m展向位置翼型周围气压及流速计算结果,以及叶片最大结构位移计算结果的误差均小于3%。

参考文献(References)

[1] 李媛,康顺,仇永兴,等. 风切变条件下风轮流固耦合数值模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(3): 462-466.
Li Yuan, Kang Shun, Qiu Yongxing, et al. Numerical simulation of fluid-structure coupling of wind turbine rotor in wind shear flow[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(3): 462-466.

[2] 胡丹梅,张志超,孙凯,等. 风力机叶片流固耦合计算分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(17): 98-104.
Hu Danmei, Zhang Zhichao, Sun Kai, et al. Computational analysis of wind turbine blades based on fluid-structure interaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(17): 98-104.

[3] Bazilevs Y, Hsu M C, Akkerman I, et al. 3D simulation of wind turbine rotors at full scale. part I: geometry modeling and aerodynamics[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2010, 65(1-3): 207-235.

[4] Bazilevs Y, Takizawa K, Tezduyar T E, et al. Aerodynamic and FSI analysis of wind Turbines with the ALE-VMS and ST-VMS methods[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2014, 21(4): 359-398.

[5] Hsu M C, Bazilevs Y. Fluid-structure interaction modeling of wind turbines: Simulating the full machine[J]. Computational Mechanics, 2012, 50(6): 821-833.

[6] Zhang Jianping, Guo Liang. The influence of wind shear on vibration of geometrically nonlinear wind turbine blade under fluid-structure interaction[J]. Ocean Engineering, 2014, 84(1): 14-19.

[7] 任年鑫,李玉刚,欧进萍. 浮式海上风力机叶片气动性能的流固耦合分析[J]. 计算力学学报, 2014, 31(1): 91-95.
Ren Nianxin, Li Yugang, Ou Jinping. The fluid-structure interaction analysis of aerodynamic performance of floating offshore wind turbine blade[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2014, 31(1): 91-95.

[8] 陈海萍,孙文磊,郭健. 风力发电机叶片的流固耦合分析[J]. 机床与液压, 2010, 38(19): 79-82.
Chen Haiping, Sun Wenlei, Guo Jian. Fluid-solid coupling analysis on wind generator blade[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(19): 79-82.

[9] 李德源,莫文威,夏鸿建,等. 水平轴风力机柔性叶片气弹耦合分析[J]. 太阳能学报, 2015, 36(3): 734-742.
Li Deyuan, Mo Wenwei, Xia Hongjian, et al. The aeroelastic coupling analysis of flexible blades for a horizontal axis wind turbine[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(3): 734-742.

[10] 王旭东,王立存,夏洪均. 基于气弹耦合理论的风力机气动与结构性能数值模拟[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(2): 62-69.
Wang Xudong, Wang Licun, Xia Hongjun. Numerical simulation of aerodynamic and structural performance for wind turbine blades based on aeroelastic coupling theory[J]. Machine Design and Research, 2015, 31(2): 62-69.

[11] Dong O Y, Oh J K. Predicting wind turbine blade loads and aeroelastic response using a coupled CFD-CSD method[J]. Renewable Energy, 2014, 70(1): 184-196.

[12] 梁明轩. 风力机叶片流固耦合机理研究[D]. 沈阳工业大学, 2011.
Liang Mingxuan. Research on Fluid-Structure Interaction Mechanism of Wind Turbine Blade[D]. Shenyang University of Technology, 2011.

[13] 杨华,徐浩然,沈文忠,等. 4.5 m直径风力机模型气动实验方法[J]. 扬州大学学报:自然科学版, 2012, 15(4): 55-59.
Yang Hua, Xu Haoran, Shen Wenzhong, et al. The method of aerodynamic experiment for a wind turbine model with the diameter of 4.5 m[J]. Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition, 2012, 15(4): 55-59.

[14] 潘旭. MW级风力发电机风轮叶片流固耦合强度分析[D]. 郑州大学, 2011.

- Pan Xu. Strength analysis of fluid solid interaction field of MW grade wind turbine blades[D]. Zhengzhou University, 2011.
- [15] 陆洋, 周桂林. 水平轴风力机叶片气弹建模与响应分析[J]. 空气动力学学报, 2012, 30(2): 192-197.

Lu Yang, Zhou Guilin. Modeling and analysis of the aeroelastic response of the horizontal axis wind turbine blade[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012, 30(2): 192-197.

Method for wind turbine blade FSI numerical simulation

WANG Weilong, TIAN De, DENG Ying, LIN Junjie

State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

Abstract Taking a 5 MW wind turbine blade as an example in our research, a rotor rotation simulation for the fluid-structure interaction is made. The combination of the wind rotation speed and the inflow velocity is simulated by considering the wind shear effect, and the torsion angles of the blade airfoil at different cross sections are modified, to establish the rotation simulation model of a wind turbine blade. The wind tunnel test of the wind turbine blade is simulated through a finite element software. The air pressure and the flow speed under the rotation effect around the blade together with the blade surface pressure are simulated. Using a data exchange platform to exchange the blade structure displacement and the surface pressure data, obtained through structure and fluid calculations, respectively, the fluid-structure interaction results are obtained. The results are compared with those at the rated wind speed and the reference experiment, and the rotation simulation method is verified.

Keywords wind turbine blade; fluid-structure interaction (FSI); wind shear; rotor rotation simulation

(责任编辑 韩星明)